

Verbundkörper aus Sinterwerkstoff und kompaktem Metall, hergestellt durch Aufpressen und Sintern

Hofmann, Wilhelm
Schmalenbach, Ernst

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 3, 1951,
S. 163-176



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Verbundkörper aus Sinterwerkstoff und kompaktem Metall, hergestellt durch Aufpressen und Sintern

Von **Wilhelm Hofmann** und **Ernst Schmalenbach**

Mit 13 Abbildungen

Vorgelegt von Herrn **Otto Schmitz**

Abstract: Joints of sintered powder-metal and wrought metal were obtained in the following combinations: iron-powder upon steel, iron-copper upon steel, lead bronze upon steel, tungsten-copper upon copper, silver-graphite upon copper. The powder was pressed into the surface of the base metal and then both were sintered. The influence of the grain size, of the amount of pressure applied and of the sintering temperature were investigated. The strength of the joint was examined by tensile and shear tests. Values of the strength of the joints in the order of a few kg/mm² were observed. These values could be further enlarged by conclusive forging. This paper mainly describes the observations made in non-ferrous metals.

Verwendete Metallpulver, Vorversuche

Gegenüber dem in der Praxis angewandten Verfahren, Sinterwerkstoffe und kompaktes Metall durch Löten miteinander zu verbinden, etwa Sinterhartmetall und Werkzeugstahl, wurde die Möglichkeit untersucht, bereits bei der Herstellung der Sinterkörper durch Pressen und Sintern den Verbund mit einem gekneteten Werkstoff zu erzielen. Im Schrifttum der Pulvermetallurgie¹⁾ finden sich keine Hinweise hierauf. Einige Anregungen kann man der Technik des Metallspritzens entnehmen, denn die dort angewandte Aufrauhung des zu behandelnden Werkstückes zwecks Vergrößerung der Oberfläche dürfte auch für die hier gestellte Aufgabe von Bedeutung sein. Die Versuche wurden mit Eisenpulvern verschiedener Herkunft: Hametag-Pulver, durch Zerkleinern von Eisendrähnen in Wirbelschlagmühlen erzeugt, DPG-Schleuderpulver (Deutsche Pulvermetallurgische Gesellschaft) der Eisenwerke Mülheim-Meiderich, RZ-Pulver (Roheisen-Zunder-Verfahren) der Mannesmann-Röhrenwerke in Duisburg-Huckingen, ferner mit Pulver aus Kupfer, Bleibronze, Wolframkupfer, Silbergraphit durchgeführt. Trägerwerkstoff war bei Wolframkupfer und Silbergraphit Kupfer, bei den übrigen Pulverarten Stahl. Nachdem über die an Eisen- und Kupferpulver gemachten Beobachtungen an anderer Stelle berichtet werden wird²⁾, sollen hier in erster Linie die an den übrigen Nichteisenmetallpulvern gewonnenen Ergebnisse dargestellt werden. Von ihnen verdient Bleibronze als Lager-, Wolframkupfer und Silbergraphit als Kontaktbaustoff Beachtung.

Die Eigenschaften der verwendeten Pulver sind im folgenden zusammengestellt:

Bleibronze-Pulver. Das Legierungspulver enthielt nach den Angaben der Lieferfirma 26% Pb, 74% Cu. Es war durch mechanisches Zerstäuben einer Legierungsschmelze von Elektrolytkupfer und Elektrolytblei erzeugt worden. Wir unterzogen es einer zweistündigen Glühung bei 300° in Wasserstoff und konnten anschließend folgende Feststellungen treffen:

	Gesamt	abgesiebt		
		< 0,30 mm	< 0,15 mm	< 0,06 mm
Siebanalyse:				
> 0,40 mm	30%	—	—	—
0,40—0,30 mm	12%	—	—	—
0,30—0,15 mm	37%	64%	—	—
0,15—0,06 mm	17%	29%	81%	—
0,06—0 mm	4%	7%	19%	100%
Füllvolumen cm ³ /100 g	28,0			
Klopfvolumen cm ³ /100 g	22,0	—	—	—
Füllichte g/cm ³	3,6			
Klopfichte g/cm ³	4,5			
Preßichte g/cm ³				
für Preßdruck:				
3,0 t/cm ²	—	8,42	8,32	—
5,0 t/cm ²	—	8,90	8,90	8,85

Wolframkupfer-Pulver. Das Pulvergemisch hatte die Zusammensetzung 60% W, 40% Cu. Die Siebanalyse ergab einen Anteil von 100% an Körnern unter 0,06 mm. Füllvolumen: 44,5 cm³/100 g. Klopfvolumen: 30,0 cm³/100 g. Füllichte: 2,25 g/cm³, Klopfichte: 3,33 g/cm³, Preßichte: für Preßdruck 5,0 t/cm² 9,97 g/cm³, für Preßdruck 6,0 t/cm² 10,33 g/cm³.

Silbergraphit-Pulver. Das Pulvergemisch enthielt 95% Ag, 5% Graphit. Die Siebanalyse ergab sehr feines Korn, 100% Anteil < 0,06 mm. An sonstigen Daten wurde nur die Preßichte für 5 t/cm² Preßdruck bestimmt. Sie lieferte den Wert 8,08 g/cm³.

In einigen Vorversuchen mit Eisenpulver prüften wir zunächst an Probekörpern aus Stahl 37 den Einfluß der Oberflächenvorbereitung. Nach Schleifen der Probe auf grobem Schleifband wurde keinerlei Haftung des Preßlings auf dem Stahl erzielt, so daß dieses Verfahren gänzlich ausschied.

Gute Ergebnisse zeitigte dagegen die Aufräuhung durch Aufbringen von Drehriefen. Mit einem spitzen Drehstahl wurden in die Oberfläche konzentrische Riefen eingedreht. Wichtig war, daß die Riefen gleichmäßig breit und tief ausgeführt wurden und so dicht wie möglich nebeneinander, ohne daß dazwischen Reste der ursprünglichen Oberfläche stehen blieben. Der Preßling haftete auch bei geringen Preßdrücken gut auf der Stahlprobe. Nach dem Sintern ergab sowohl die einfache mechanische Prüfung als auch die metallographische Untersuchung einen guten Verbund und zwar bei Eisen- wie auch bei Kupfer-Pulver.

Weiterhin wurden einige Proben mit einem Sandstrahlgebläse behandelt. Der verwendete 1 mm-Stahlkies war z.T. stark angerostet. Er lieferte wohl eine gute Aufräuhung, so daß der Preßling auf der Stahlprobe haftete, aber

der Rost verunreinigte die Stahloberfläche, was für einen guten Verbund von Nachteil ist. Dennoch hatten einige Proben nach dem Sintern gute mechanische Festigkeit, so daß dies Verfahren als Vorbehandlung des Stahls bei sorgfältiger Durchführung brauchbar erscheint. Durch Beizen in Schwefelsäure wurde wohl eine gewisse Aufrauung erzielt, doch genügte sie nur bei hohen Preßdrucken, um dem Preßling eine Haftung auf der Stahlprobe zu verleihen.

Endlich nahmen wir einige Tastversuche mit dem sogenannten Heißenpressen oder Drucksintern vor. Eisenpulver wurde lose auf die durch Schleifen auf grobem Band vorbereitete Stahlprobe gegeben und ohne oder mit geringer Druckbelastung gesintert. Der Verbund war in allen Fällen einwandfrei, obwohl bei der angewandten Arbeitsweise der Sinterkörper sehr weich und porös war. Die apparativen Schwierigkeiten erlaubten aber nicht, in dieser Richtung weiterzuarbeiten. Wir beschränkten uns daher in den weiteren Versuchen auf die Vorbereitung der Verbundfläche des kompakten Metalles durch Erzeugung von Drehriefen der oben angegebenen Art. An ihre Stelle traten bei den Stäbchen für den Scherversuch Hobelriefen.

Vorrichtungen

Aus den Vorversuchen ging hervor, daß sich nach entsprechender Vorbereitung der Unterlage mittels Kaltpressens und Sinterns ein Verbund zwischen kompaktem Metall und Sinterwerkstoff erzielen läßt. Die weitere Aufgabe war, die Güte des Verbundes in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen bei der Herstellung zahlenmäßig zu erfassen. Dazu war vor allem die Prüfung unter Normal- und Schubbeanspruchung nötig. Für die Durchführung dieser Untersuchungen war die Entwicklung besonderer Prüfkörper sowie von Vorrichtungen zu deren Herstellung und Prüfung erforderlich.

Zur Bestimmung der Normalfestigkeit des Verbundes wurde der Zerreißstab zuerst so gestaltet, daß zwischen zwei zylindrische Stahlbolzen eine gewisse Pulvermenge gepreßt wurde. Es entstanden also zwei Verbundflächen, zwischen dem Preßling und jedem der beiden Stahlbolzen. Der Zerreißstab war vollkommen zylindrisch. Eine Verjüngung im mittleren Teil wie bei Stäben aus homogenem Material war wegen der geringen Festigkeit des Sinterwerkstoffes und des Verbundes nicht notwendig. Eine Schwierigkeit bei diesen Versuchen war, daß die Stahlbolzen bei den angewandten hohen Preßdrucken gestaucht wurden und daher in der Bohrung klemmten. Um dies zu vermeiden, fertigten wir die Bolzen daraufhin aus St 60 des Hüttenwerkes Rheinhausen und versahen sie an der Stirnfläche durch Stumpfschweißen mit einer dünnen Scheibe aus St 37. Dann härteten wir das Ganze und brachten auf der weichgebliebenen Stirnfläche Drehriefen an. Auch die so hergestellten glatten Stäbe bereiteten noch Schwierigkeiten bei den Zerreißversuchen durch Verkanten beim Einspannen. Dies gab Anlaß zur Konstruktion einer besonderen Vorrichtung, die unter Verwendung von einigen Kettengliedern eine zentrische Einspannung der Stäbe gewährleistete. Dazu mußte die bisherige glatte, zylindrische Stabform verlassen werden. Die Stahlbolzen erhielten an ihrem härtbaren Ende einen Schalterkopf, der in der Hülse der Einspannvorrichtung auf einem geteilten Unterlegling ruhte (Abb. 1). Das Stück aus St. 37 wurde etwa 10 mm lang gehalten, um eine mehrmalige Verwendung der Bolzen nach

jeweils wiederholter Härtung und Anbringung neuer Drehriefen zu ermöglichen. Zum Pressen dieser Schulterstäbe wurde die in Abb. 2 dargestellte Matrize geschaffen. In dieser war die eigentliche Preßform in vier Teile zerlegbar, so daß man den gepreßten Stab bequem entnehmen konnte, ohne ihn durch

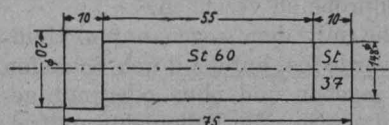


Abb. 1. Stahlbolzen für Schulterstäbe

die ganze Matrize hindurchdrücken zu müssen, was auch wegen der Schulterköpfe nicht möglich war. Als Schmiermittel für die Bolzen diente Öl. Die Preßform aus St 60 steckte in der Mitte mit einem konischen Sitz in einem 35 mm starken Ring, der seinerseits nach dem Prinzip der sogenannten schwimmenden Matrize auf Federn ruhte und von Führungen aus 10 mm Silberstahl-Bolzen gehalten wurde. Der untere Stahlbolzen wurde in der Grundplatte in eine entsprechende Bohrung eingesetzt. Bei der Konstruktion mußte auf das verschiedene Füllvolumen der einzelnen Metallpulver Rücksicht genommen werden. Die Pulverfüllung mußte sich jeweils in der Mitte der Preßform befinden, damit auch der Preßling in der Mitte, d.h. im Bereich

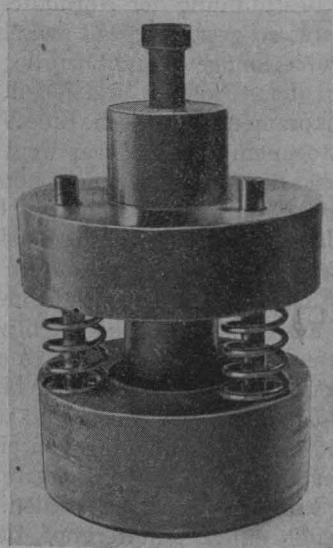
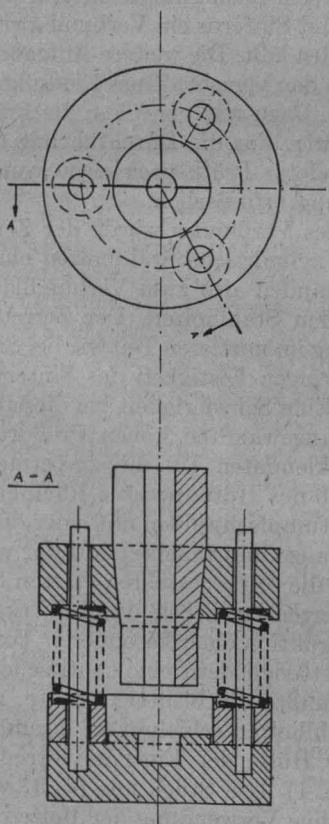


Abb. 2. Zerlegbare Matrize für Schulterstäbe in Draufsicht, Schnitt und Ansicht

des die Preßform zusammenhaltenden Ringes lag. Das wurde durch das Einsetzen verschieden ringförmiger Unterlegscheiben zwischen Grundplatte und Federn erreicht.

In Abb. 3 sind die zum Pressen fertig vorbereiteten Stahlbolzen, der gepreßte und gesinterte sowie der zerrissene Probestab nebeneinander dargestellt. Diese Vorrichtung bewährte sich bei allen im folgenden beschriebenen Versuchen.

Für die Untersuchung der Festigkeit des Verbundes bei Schubbeanspruchung war zuerst an die Durchführung eines Biegeversuches gedacht worden. Dabei sollte die Kraft senkrecht zur Verbundfläche angreifen. Letztere mußte so bemessen werden, daß mit der vorhandenen 20 t-Zerreißmaschine ein spezifischer Preßdruck von 6 t/cm^2 zu erreichen war. An der hierfür entwickelten Matrize wurde die eigentliche Preßform aus naturhartem

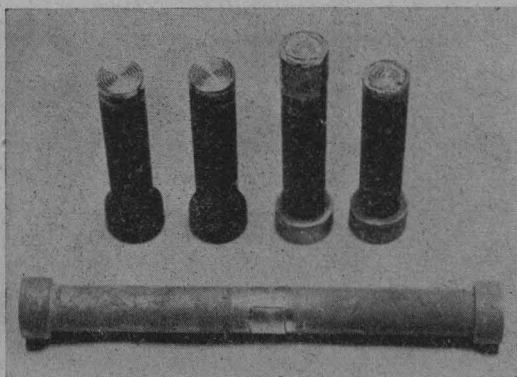


Abb. 3. Zerreißstab mit Schulterköpfen: Hälften zum Pressen vorbereitet, Stab nach dem Sintern, Hälften zerrissen

Stahl für Eisenbahnradbandagen (0,72% C) hergestellt. Die Stempel bestanden aus gehärtetem St 60. Für die Biegestäbchen wurde Flachstahl aus St 37 mit 0,09% C verwendet. Wir arbeiteten diesen auf $45 \times 5 \text{ mm}$ ab und versahen ihn auf der Oberfläche mit spitzen Hobelriefen von etwa 0,5 mm Tiefe und 0,7 mm Breite. Von dem so vorbereiteten Stahl wurden mit einem Scheibenfräser die einzelnen Proben mit 7 mm Breite abgeschnitten, so daß die Gesamtabmessungen $45 \times 7 \text{ mm}$ in der Preßebene bei 5 mm Dicke betrugen. Dieser Stahlteil wurde bei der Herstellung der Probestäbchen zuerst in die Matrize gelegt, dann das Pulver aufgeschüttet und mit einem Spatel glatt gestrichen. Zur Schmierung diente Hydrokollag. Nach dem Pressen wurden die Proben mit einem besonderen Stempel nach unten ausgedrückt.

Nachdem die Biegeversuche nicht voll befriedigten, gingen wir zu reinen Scherversuchen über, wie sie Th. Everts³⁾ bei der Untersuchung gespritzter Metallüberzüge anwandte und wie sie auch bei der Prüfung der Leimverbindungen von Hölzern üblich sind⁴⁾. Zu diesem Zweck ließen sich die gleichen Stäbchen verwenden, die ursprünglich für den Biegeversuch entwickelt worden waren. Wie in Abb. 4 wiedergegeben, erhielten Sinterkörper und Stahl Einschnitte bis zur Verbundfläche, die im Abstand d gegeneinander versetzt waren. Der Abstand d war so zu wählen, daß die Zugfestigkeit des Sinterkörpers höher als die Schubfestigkeit des Verbundes war. Die Stäbe bei den Versuchen mit Wolframkupfer und Silbergraphit auf Kupfer waren nach dem gleichen Prinzip, wenn auch in etwas abgewandelter Form, gestaltet (siehe unten). Zum Zerreißen diente eine 3 t-Maschine von Losenhausen, in der sich die Stäbchen ohne besondere Vorrichtung einspannen ließen. Bei der Aus-

wertung der Zug- und Scherversuche wurde mit dem geometrischen Wert der Bruchoberfläche gerechnet ohne Berücksichtigung der durch die Dreh- bzw. Hobelriefen vergrößerten tatsächlichen Oberfläche. Eine weitere Vernachlässigung bestand darin, daß die Zerreißrichtung bei den Scherversuchen senkrecht zu den Hobelriefen stand.

Die Preßlinge erhielten bei den Zerreißstäben mit Eisen- und Kupferpulver eine Höhe von 10 mm, bei den Stäbchen für den Scherversuch 7 mm. Die

Pulvermenge wurde entsprechend der jeweiligen Preßdichte auf rund 0,1 g genau abgewogen. Um bei dem Preßvorgang Unregelmäßigkeiten auszuschalten, wurde der Druck bei allen Versuchen möglichst einheitlich in etwa 45 sec aufgebracht und 3 sec gehalten. Das Sintern erfolgte in einem Silitstabofen von Heraeus mit automatischer Temperaturregelung, für den wir einen rohrförmigen Einsatzkasten von 150 mm Durchmesser und 1000 mm

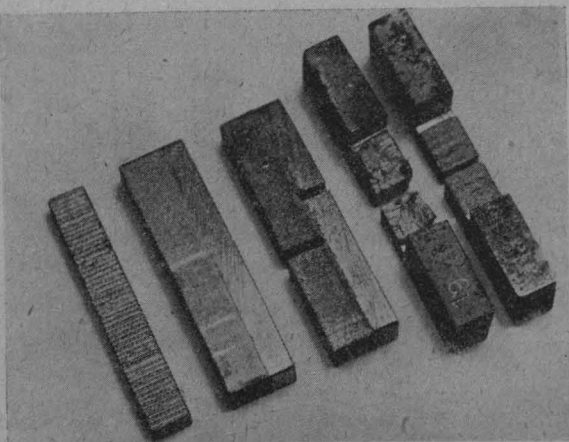


Abb. 4. Werdegang der Stäbchen für den Scherversuch

Länge aus hochhitzebeständigem Stahl (Thermax 11 A der Deutschen Edelstahlwerke Krefeld) anfertigten. Er konnte bis 1200° gebraucht werden und faßte bis 36 Zerreißstäbe in horizontaler Lage.

Als Schutzgas für die Glühungen verwendeten wir technischen Wasserstoff, für die Abkühlperiode von 1½ bis 2 Stunden reinsten Wasserstoff aus dem Kippischen Apparat oder der Stahlflasche.

Bleibronze auf Stahl. Da das verwendete Pulver lange gelagert hatte und eine merkliche Oxydation anzunehmen war, führten wir die oben erwähnte Glühung bei 300° unter Wasserstoff durch, doch zeigten die späteren Versuche, daß die Reduktion nur unvollkommen war. Mit Rücksicht auf den geringen Anteil des Pulvers mit kleiner Korngröße wurde der Preßling an den Zerreißstäben nur mit 5 mm Höhe bemessen, aus dem gleichen Grunde verzichteten wir auf Scherversuche. Die Dauer des Sinterns in Wasserstoff betrug 2 Stunden. Von den verschiedenen Einflußgrößen wurde die Wirkung der Korngröße, des Preßdruckes und der Sintertemperatur untersucht. In einer ersten Versuchsreihe wurden die Korngrößen mit < 0,30, < 0,15 und < 0,06 mm gewählt, der Preßdruck zu 5 t/cm². Die Korngrößenverteilung ist aus S. 164 zu entnehmen. Beim Pressen zeigte das Pulver mit unter 0,06 mm Durchmesser geringe Formbeständigkeit. Die Stäbe mußten sehr vorsichtig gehandhabt werden, damit sie nicht zerbrachen. Die übrigen Korngrößen machten keine derartigen Schwierigkeiten. Nach dem Sintern waren die Preßlinge deutlich aufgequollen. Bei den Zugversuchen trat der Bruch in den meisten Fällen am Unterteil ein,

wie auch früher bei Stahl beobachtet. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei der schwimmenden Matrice ein Teil der vom Oberstempel aufgebrachtten Kraft in die Federn abgeleitet wird, die vom Unterstempel auf das Pulver ausgeübte Kraft daher um diesen Betrag verringert ist. Die erreichten Zugfestigkeiten des Verbundes liegen wenig über 1 kg/mm^2 , die Unterschiede in der Zugfestigkeit sind bei den verschiedenen Korngrößen unbedeutend. Es wurde daraufhin nur mit der Korngröße $0,15 \text{ mm}$ weitergearbeitet. Die Versuche der vorhergehenden Reihe wurden mit dem Preßdruck 3 t/cm^2 ergänzt. Die hier erreichten Festigkeitswerte lagen mit rund $0,85 \text{ kg/mm}^2$ etwas niedriger.

Der Einfluß der Sintertemperatur ergab sich in einer weiteren Versuchsreihe, wo der Preßdruck zu 5 t/cm^2 , die Glüh­temperatur zu 600° , 750° , 900° gewählt war. Die gesinterten Proben zeigten mit abnehmender Temperatur geringere Aufwölbungen, so daß die bei 600° geglühten Proben fast unverändert waren. Die Festigkeitswerte stiegen mit zunehmender Temperatur an, doch liegen die absoluten Werte recht niedrig (Abb. 5). Zur metallographischen Untersuchung wurden die Schiffe ungeätzt betrachtet; man erkannte dann die Bleiverteilung besser, doch war nicht immer eindeutig zu entscheiden, ob es sich bei den dunklen Flächen um Blei oder um Poren handelte. Aus den Abb. 6 und 7 ist ersichtlich, wie mit steigender Temperatur die Korngröße des Kupfers zunimmt und gleichzeitig die Bleiverteilung gröber wird. Der Verbund ist nicht sonderlich gut. Es ist deutlich ein Saum feiner Bleieinschlüsse oder Poren in der

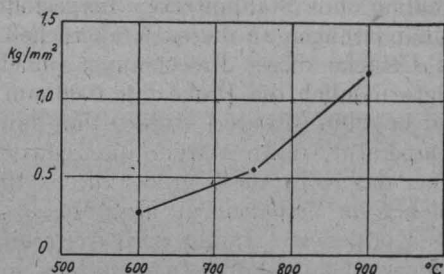


Abb. 5. Einfluß der Sintertemperatur auf die Zugfestigkeit des Verbundes von Sinterbleibronze mit Stahl

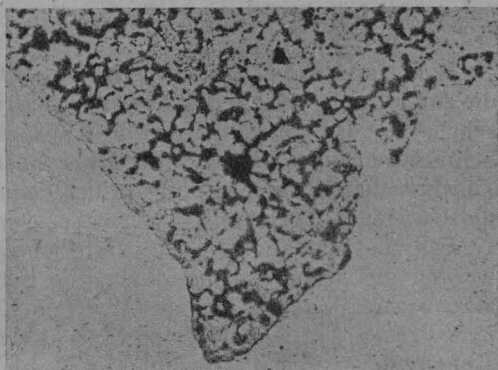


Abb. 6. Stahl und Bleibronze. Korngröße $< 0,15 \text{ mm}$, Preßdruck $5,0 \text{ t/cm}^2$, gesintert bei 600° . Ungeätzt. 125 : 1

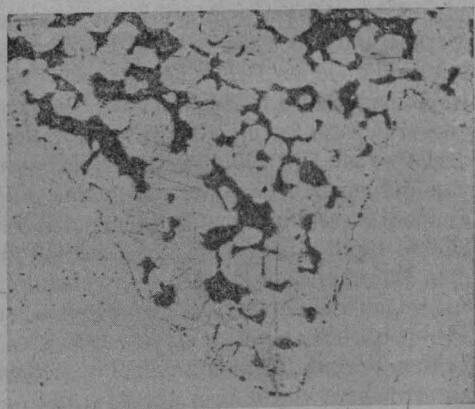


Abb. 7. Stahl und Bleibronze, wie oben, aber gesintert bei 900° . Ungeätzt. 125 : 1

Grenzlinie zu erkennen. Sicher wird hierdurch die Diffusion, wie man sie bei Kupfer und Stahl feststellen kann, beeinträchtigt. Zur Untersuchung der Aufwölbung der Proben beim Glühen wurde bei jedem Versuch ein zusätzlicher Preßling ohne Stahlunterlage hergestellt und gesintert. Die Beobachtung der Maßänderungen an diesen Körpern ließ auf den Sauerstoffgehalt des Pulvers als Ursache dieser Erscheinung schließen. Die größten Längenänderungen zeigte nämlich die Probe mit 0,06 mm Korngröße, die mit 5 t/cm² gepreßt und bei 900° gesintert wurde. Man kann dies so verstehen, daß je höher die Temperatur, desto stärker die reduzierende Wirkung des Wasserstoffs, je feiner das Korn, desto größer die oxydierte Oberfläche der einzelnen Pulverteilchen im Verhältnis zu ihrer Masse. Je höher der Preßdruck und je feiner das Korn, desto stärker wird weiterhin die Verdichtung des Pulvers, desto mehr werden die Poren zugequetscht, so daß der gebildete Wasserdampf nicht entweichen kann. Aus diesen letzten Beobachtungen geht hervor, wie wichtig es ist, ein frisch hergestelltes Pulver zu verarbeiten. Der Sauerstoffgehalt dürfte sich sicher auch quantitativ auf die Versuchsergebnisse ausgewirkt haben, so daß die Werte mit einem gewissen Vorbehalt zu betrachten sind.

Wolfram-Kupfer auf Kupfer. Bei der Versuchsdurchführung bereitete die Anfertigung von Zerreißstäben Schwierigkeiten. Das Anlöten einer Kupferscheibe an den Stahlbolzen schied aus, weil die Sintertemperatur über der Schmelztemperatur des Lotes gelegen hätte. Es wurde daher anfänglich von Zugversuchen abgesehen und nur der Scherversuch und die Härteprüfung für die Untersuchung herangezogen.

Um die Preßlinge zwecks Materialersparnis möglichst klein zu halten, wurden die Scherversuchsstäbchen so gestaltet, daß zwischen zwei Kupferstäbchen von 5 mm Dicke das Wolfram-Kupfer-Pulver mit 3 mm Höhe nach dem Pressen lag. Die Verbundfläche des Kupfers war in üblicher Weise mit Hobelriefen versehen. Das Pulver ließ sich sehr gut verpressen. Die Preßlinge hatten, zumal mit hohen Preßdrucken gearbeitet wurde, gute Formbeständigkeit. Da die Kontaktmetalle der Technik nach dem Pressen zur Erzielung eines dichten Gefüges noch weitere Bearbeitung durch Walzen, Schmieden oder dgl. erfahren, untersuchten wir auch den Einfluß des Nachpressens auf die Festigkeit des Verbundes. Die Proben wurden hierzu in derselben Matrice mit dem gleichen Druck nachgepreßt, unter dem das erste Pressen erfolgt war. In einem Fall schloß sich an das Nachpressen noch ein zweites Sintern bei der vorherigen Sintertemperatur an. Zur Durchführung der Scherversuche wurde der Abstand der Einschnitte zunächst mit 7 mm gewählt. Der Schnitt ging von der einen Seite aus durch das Kupfer bis zur Verbundfläche, von der anderen Seite durch das Kupfer und Wolfram-Kupfer bis zur gleichen Verbundfläche. Beim Aufbringen der Last riß zuerst das Wolfram-Kupfer gegenüber dem Einschnitt im Kupfer auf, wobei die Last abfiel. Dann trat unter erneutem Ansteigen der Belastung ein leichtes Verbiegen der Kupferteile ein, bis die Probe nach Erreichen eines zweiten, niedrigeren Höchstwertes der Last in beiden Verbundflächen zugleich einriß und brach. Um ein besseres Abscheren zu erreichen, wurde nun der Abstand der Einschnitte auf 4 bis 5 mm verkürzt (Abb. 8). Dennoch waren die Erscheinungen beim Zerreißen noch nicht wie gewünscht. Wenn als Ergebnis der Versuche der beim Einreißen des Wolfram-

Kupfers erreichte Höchstwert der Belastung angesehen wurde, so kann doch die daraus bestimmte Festigkeit nur als untere Grenze der Schubfestigkeit des Verbundes angesehen werden.

Da das Ergebnis der Scherversuche nicht voll befriedigte, wurden die Reststücke der Scherversuchsstäbchen zur Durchführung eines Zugversuches herangezogen. Die Proben wurden auf 15 mm abgeschnitten und mit Silberlot (70% Ag, 30% Cu) zwischen zylindrische Stahlbolzen gelötet. Die Lötung erfolgte mit Hilfe von Flußmitteln unter Wasserstoff bei 820°. Naturgemäß konnte dieses Verfahren bei den nachgepreßten Proben nicht angewandt werden. Zur Einspannung der Stäbe dienten Beißkeile der Zerreißmaschine. Der Bruch erfolgte zumeist im Verbund. Zum Teil blieb etwas Wolfram-Kupfer in den Riefen haften. Je höher die Festigkeit war, in desto stärkerem Maße verlief der Bruch auch durch das Sintermetall. Dabei näherte sich also die Festigkeit des Verbundes der des Sinterwerkstoffes. Schließlich bestimmten wir bei den Versuchen auch die Brinellhärte und zwar sowohl am Wolfram-Kupfer als auch an der Kupferunterlage.

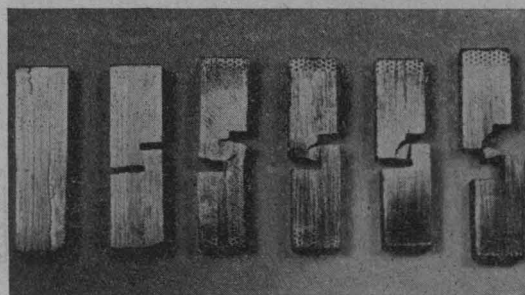


Abb. 8. Verlauf des Scherversuches bei Verbundstücken von Wolfram-Kupfer und Kupfer

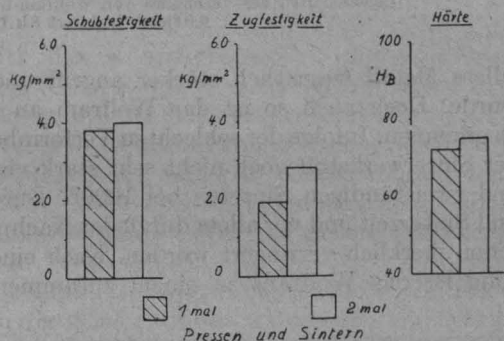


Abb. 9. Einfluß des Nachpressens auf die Eigenschaften des Verbundes von Wolfram-Kupfer mit Kupfer

Wegen der geringen Menge des zur Verfügung stehenden Pulvers wurden für Preßdruck und Sintertemperatur von vornherein möglichst hohe Werte gewählt und diese nur wenig variiert. Der Einfluß der Veränderung dieser Versuchsbedingungen auf die Ergebnisse ist daher nur gering, so daß auf seine Darstellung verzichtet werden kann. Von besonderer Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften des Verbundes ist das Nachpressen (Abb. 9). Die Schubfestigkeit wird bei den verschiedenen Versuchsbedingungen um 100% und mehr erhöht. Bei der Härte fällt besonders die Probe mit achtstündiger Glühzeit bei 1050° auf, die einen Wert von 110 Brinelleinheiten erreicht. Leider konnte hier nicht auch die Zugfestigkeit bestimmt werden. Zweifaches Pressen und Sintern, wie es für 6t/cm² Preßdruck und achtstündiges Glühen bei 1050° durchgeführt wurde, wirkt sich gegenüber der einfachen Bearbeitung hauptsächlich in der Zugfestigkeit aus (Abb. 10). Schubfestigkeit und Härte verändern sich kaum.

Die metallographische Untersuchung vervollständigte das Bild von den bei dieser Kombination von Werkstoffen sich abspielenden Vorgängen. Die Schiffe wurden ungeätzt betrachtet, da die Ätzlösung Wolfram als das un-

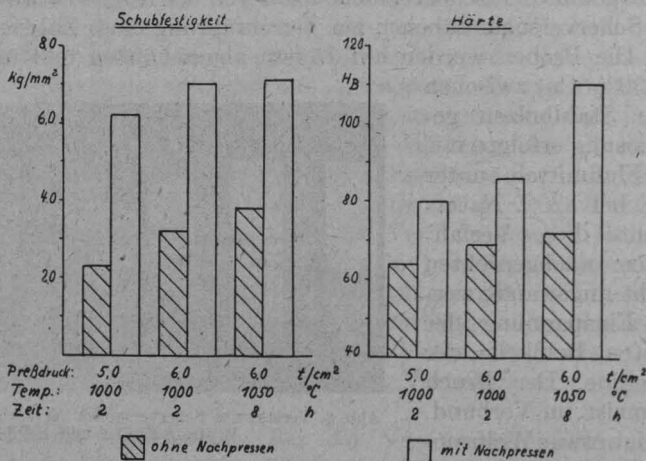


Abb. 10. Einfluß des zweifachen Pressens und Sinterns auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes von Wolfram-Kupfer und Kupfer. Pressdruck 6,0 t/cm², gesintert 8 h bei 1050°

edlere Metall wesentlich stärker angriff und das Bild dadurch unscheinbar wurde. Doch auch so ist das Wolfram an seiner etwas dunkleren Färbung zu erkennen. Infolge der schlechten Verformbarkeit des Wolframs ist in Abb. 11 der Sinterwerkstoff noch nicht sehr stark verdichtet, trotz 6 t/cm² Preßdruck und zweistündigen Sinterns bei 1000°. Durch die erhöhte Sintertemperatur und Sinterzeit und vor allem durch das Nachpressen ist in Abb. 12 die Porosität schon merklich verringert worden. Nach einer anschließenden zweiten Sinterung ist das Wolfram zu einem zusammenhängenden Skelett verwachsen,

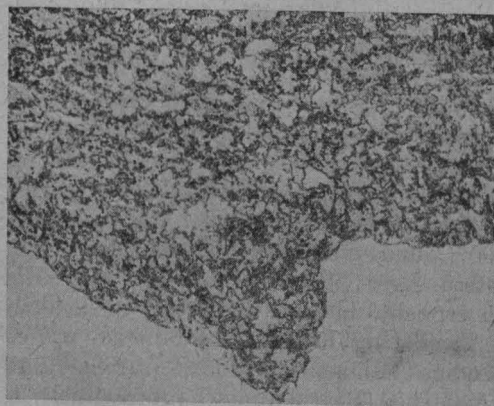


Abb. 11. Wolfram-Kupfer auf Kupfer. Gepreßt mit 6,0 t/cm², gesintert 2 h bei 1000°. Ungeätzt. 125:1

in das das Kupfer eingelagert ist. Die die Festigkeit steigernde Wirkung des Nachpressens ist eine Folge der Kaltverformung, wie die Veränderung der Härte sowohl von Kupfer als auch von Wolfram-Kupfer zeigt. Bei dem Sintermetall ist zudem, wie schon angedeutet, mit einer Verdichtung zu rechnen. Für den Verbund haben beide Vorgänge Bedeutung. Das Verschließen der Poren erhöht die Wirkung der Adhäsionskräfte, die Kalthärtung steigert die Festigkeit in den durch Kristallisationsvorgänge entstandenen

Brücken zwischen Kupferunterlage und Kupferanteil des Preßlings. Durch das zweite Sintern geht zwar die Kaltverfestigung verloren. Sie ist aber Anlaß zu erneuten Kristallisationsvorgängen, die die Dichte des Sintermetalls sowie die Güte des Verbundes weiter steigern. Dies muß sich außer in den mechanischen Eigenschaften vor allem auch in einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit bemerkbar machen.

Die bei der Herstellung der Kontaktmetalle übliche Arbeitsweise, die gesinterten Preßlinge durch Walzen, Schmieden oder gar Strangpressen kräftig zu verformen, um ein dichtes Gefüge zu erzielen, bewährt sich somit in gleicher Weise für die Verbindung des Sinterwerkstoffes mit dem kompakten Trägermetall.

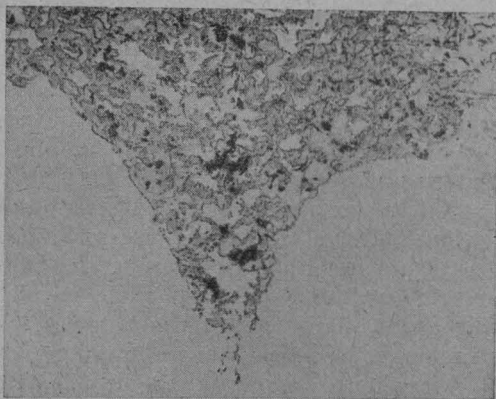


Abb. 12. Wolfram-Kupfer auf Kupfer. Gepreßt mit $6,0 \text{ t/cm}^2$, gesintert 8 h bei 1050° . Ungeätzt. 125:1

Silbergraphit auf Kupfer. Unter den Kontaktbaustoffen findet Silbergraphit in letzter Zeit zunehmende Verwendung. Der Werkstoff wurde ursprünglich entwickelt, um das Verschweißen der elektrischen Kontakte zu verhindern⁵⁾. Er wird vor allem eingesetzt in Unterbrecherkontakten und Schaltern, die keine zu große Schalthäufigkeit aufweisen, ferner in Gleitkontakten von Instrumenten und Regelwiderständen, sowie in Niederspannungsmaschinen. Über die Verarbeitung ist im Schrifttum kaum etwas angegeben, vor allem nicht über die Verbindung mit dem Trägermetall.

Das Silber-Graphit-Pulver lag ebenfalls als fertige Mischung vor. Die Herstellung der Probekörper erfolgte in der gleichen Weise wie bei den Versuchen mit Wolfram-Kupfer, indem das Pulver beiderseits mit Kupfer zum Verbund gebracht wurde. Für die Durchführung der Versuche standen nur 250 g Pulver zur Verfügung. Aus diesem Grunde wählten wir als veränderliche Größen der Versuchsbedingungen nur die Sintertemperatur und gegebenenfalls Sinterzeit, und hielten den Preßdruck mit 5 t/cm^2 konstant. Dabei kamen die Versuche wegen der auftretenden Schwierigkeiten nicht über das Stadium von Vorversuchen hinaus. Für die Höhe der Sintertemperatur war die Lage des Eutektikums im System Silber-Kupfer bei 779° von besonderer Bedeutung. Wird die Sintertemperatur über derjenigen des Eutektikums gewählt, so entsteht an der Grenzfläche der beiden Metalle eine flüssige Phase, die für die Bildung des Verbundes besonders günstig sein sollte. Bei einer Sinterung unterhalb der Temperatur der Eutektikalen sollte Verbund durch Diffusion und Bildung von Mischkristallen eintreten, wobei der Zeitfaktor eine besondere Rolle spielen mußte.

Sämtliche auf Grund dieser Überlegungen zuerst angestellten Versuche führten zu Mißerfolgen, sie sollen daher nur kurz gestreift werden. Die Proben

ließen sich ohne Schwierigkeiten pressen. Wegen der äußerst geringen Korngröße zeigte das Pulver aber schlechtes Fließverhalten beim Einfüllen in die Matrize, buk leicht zu kleinen Klumpen zusammen und ließ sich nur unvollkommen gleichmäßig verteilen. Die bei 800 und 850° gesinterten Proben zerbrachen bei der Anfertigung des Schliffes, bei dem bei 930° geglühten Stäbchen lagen die drei Teile — Kupfer, Silber-Graphit, Kupfer — nach dem Sintern lose aufeinander. Besonders auffallend war dabei eine bei 850° noch sehr geringe, bei 930° aber starke Ablagerung von Graphit auf der Grenzfläche, die eine vollständige Trennung der metallischen Werkstoffe bedingte. Von dem gebildeten Eutektikum war im Schliffbild fast nichts zu erkennen. Auch das Sintern bei 750°, d.h. unterhalb der Eutektikalen, führte nicht zum Ziel. Die Proben hatten nur geringe Festigkeit des Verbundes und zerbrachen bei Anfertigung des metallographischen Schliffes. Auf der Grenzfläche war wieder eine schwache Graphitablagerung zu erkennen. Nachdem kompaktes Kupfer und Silber-Graphit-Pulver unmittelbar nicht zum Verbund zu bringen waren, wurde eine dünne Schicht von Kupfer-Pulver zwischen die beiden Werkstoffe gebracht. Die gleichmäßige Verteilung der Pulver bereitete noch größere Schwierigkeiten als bei Silber-Graphit allein. Die Folge war unterschiedliche Dichte im Preßling und verschieden starke Schwindung beim Sintern, die sich im Auftreten feiner Risse entlang der Grenzfläche auswirkte. Weder die bei 800° noch die bei 750° gesinterte Probe ergab einen wirklichen Verbund. Auf der Bruchfläche waren wieder schwache Graphitablagerungen, ähnlich den vorhin beschriebenen, zu erkennen.

Durch die Wahl von Silber-Pulver als Zwischenschicht zwischen Kupfer und Silber-Graphit an Stelle von Kupfer-Pulver sollte die Schwierigkeit der Anwesenheit von Graphit bei der Bildung eines Verbundes zwischen Kupfer und Silber beseitigt werden. Verwendung fand Silber-Pulver der Degussa, dessen Korngröße der des Silbergraphits entsprach. Es hatte daher das gleiche schlechte Fließverhalten, was die Verarbeitung erschwerte. Die Herstellung der Probestäbchen erfolgte in der gleichen Weise wie beim vorhergehenden Versuch.

Die erste Glühung wurde bei 800° vorgenommen mit zwei Stunden Dauer. Dabei trat starke Bildung von Schmelze ein, wie sie bei den anderen Versuchen nicht beobachtet worden war. Das Silber-Pulver hatte sich mit dem Kupfer zu eutektischer Schmelze vereinigt und hatte auch das Silber-Graphit-Pulver angegriffen. Die Folge war wiederum eine starke Graphitablagerung auf der Grenzfläche zwischen Silbergraphit und dem übrigen Metall. Durch die gebildete Schmelze war die Probe fest mit der Unterlage verlötet, während sie in sich keinen Zusammenhalt aufwies.

Weitere Proben wurden bei 750° gesintert. Die Stäbchen hielten gut zusammen, hatten aber am Oberteil entlang der Grenzfläche von Silber-Pulver und Silber-Graphit mehr oder weniger starke Risse, in denen sie sich zerbrechen ließen. Diese Risse haben ihre Ursache in ungleichmäßiger Schwindung des Preßlings infolge unterschiedlicher Preßdichte, die wieder durch das schlechte Fließverhalten und die unregelmäßige Verteilung der Pulver in der Matrize begründet ist. Trotz sorgfältiger Arbeitsweise beim Einfüllen der Pulver ließen sich diese Risse nicht vermeiden, so daß mit den Stäbchen keine Scherversuche durchgeführt werden konnten. Im Schliffbild (Abb. 13) zeigte sich einwandfreier Verbund. Oben erkennt man den Silber-Graphit, der ohne

eine scharfe Grenze in das mit feinen Poren durchsetzte Sintersilber übergeht. An dieses schließt sich unten das kompakte Kupfer an. Von einer Graphitablagerung war in keinem Falle etwas festzustellen. Mit dieser Arbeitsweise wurde das beste Ergebnis erzielt. Lediglich das ungünstige Verhalten des Pulvers in Verbindung mit der schmalen rechteckigen Form der Matrize verhinderte eine quantitative Auswertung. Zur Ergänzung wurde daher abschließend ein Zugversuch durchgeführt. Für die Probekörper fanden die Stahlbolzen Verwendung, die bei den Zugversuchen mit Stahl als Grundwerkstoff benutzt worden waren. An der Stirnfläche wurde mit Messinglot eine 5 mm dicke Kupferscheibe angelötet. Auf eine nachträgliche Härtung der Bolzen konnte verzichtet werden. Auf dem Kupfer wurden in bekannter Weise Drehriefen angebracht. Die Herstellung der Stäbe erfolgte dann entsprechend den Zugversuchsstäbchen. Die Höhe des Preßlings wurde mit 5 mm gewählt. Beim Einfüllen ließ sich das Pulver in der runden Matrize besser verteilen als in der rechteckigen. An den gesinterten Stäben zeigten sich daher keine Risse wie bei den Scherversuchsstäbchen. Der Zerreißversuch ergab folgende Festigkeitswerte für die vier untersuchten Stäbe:

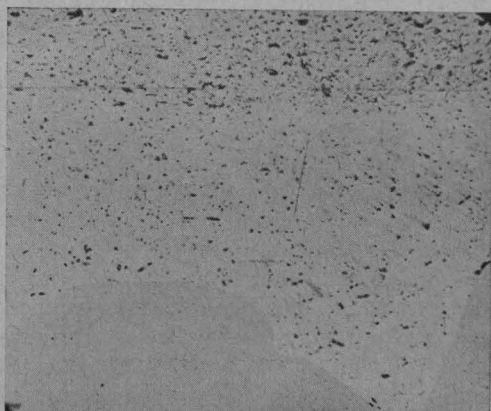


Abb. 13. Silbergraphit-Silber auf Kupfer. Gepreßt mit 5 t/cm², gesintert 2 h bei 750°. Ungeätzt. 125 : 1.

1,06 kg/mm ²	
1,23	„ Mittelwert: 1,00 kg/mm ²
1,17	„
0,56	„

Die Werte erscheinen zwar noch verhältnismäßig niedrig. Immerhin ist durch diese Versuchsanordnung eine gute Verbindung zwischen Silber-Graphit und Silber als Unterlage herbeigeführt worden, ohne daß der Graphit störend wirkt. Eine Erhöhung der Festigkeit des Verbundes zwischen Silber und Kupfer als Trägermetall wird nach den besprochenen Verfahren durchaus möglich sein.

Zusammenfassung

Es wurde die Möglichkeit untersucht, eine Verbindung zwischen Sintermetall und geknetetem Metall ohne Anwendung des bisher üblichen Lötverfahrens zu erzielen. Von den hauptsächlich untersuchten fünf Kombinationen: Sintereisen auf Stahl, Eisen-Kupfer und Blei-Bronze auf Stahl, Wolfram-Kupfer und Silber-Graphit auf Kupfer wird hier besonders auf die drei letztgenannten und die dabei erhaltenen Ergebnisse eingegangen. Zur Herstellung des Verbundes erhielt das Trägermetall eine Aufrauung durch

Dreh- oder Hobelriefen. Nach Aufpressen des Pulvers wurden die Stücke in Wasserstoff gesintert.

Zur Untersuchung der Festigkeit des Verbundes gegenüber Normal- und Schubbeanspruchung wurden geeignete Prüfkörper entwickelt. Die Zerreißstäbe wurden in einer besonders dafür konstruierten Vorrichtung zerrissen. Sie erlaubte eine genau zentrische Einspannung, ohne daß beim Zerreißen Biegespannungen auftraten. Die Schubfestigkeit wurde an kleinen Probestäbchen bestimmt, an denen die Kraft in Richtung der Verbundfläche angriff. Bei Bleibronze auf Stahl wurden Festigkeiten des Verbundes in der Größenordnung von 1 kg/mm^2 erreicht. Störend machte sich hier die durch längeres Lagern des Pulvers eingetretene oberflächliche Oxydation bemerkbar. Sie führte beim Sintern in Wasserstoff zu Volumenänderungen in den Pulverpreßlingen durch den gebildeten Wasserdampf. Bei Wolfram-Kupfer ließ sich durch ein Nachpressen der gesinterten Verbundstücke eine beträchtliche Erhöhung der Härte und Schubfestigkeit erreichen. Die Zugfestigkeit des Verbundes konnte an den nachgepreßten Stücken nicht ermittelt werden. Der Verbund von Silber-Graphit mit Kupfer bereitete große Schwierigkeiten, da an der Grenzfläche starke Graphitablagerungen auftraten. Ein Anfangserfolg wurde aber durch die Anwendung einer Schicht von Silber-Pulver zwischen dem Silber-Graphit und der Kupferunterlage erzielt. Das Gefügebild dieser unterhalb der Temperatur des Eutektikums Silber-Kupfer gesinterten Proben zeigte einwandfreien Verbund.

Für die Unterstützung der Arbeit durch Bereitstellung von Versuchsmaterialien sei vor allem folgenden Firmen gedankt:

A.G. für Bergbau- und Hüttenbedarf, Salzgitter;

Braunschweiger Hüttenwerk G.m.b.H., Braunschweig;

Hüttenwerke Rheinhausen A.G.

Herrn Dr.-Ing. E. Dürrwächter, Pforzheim, danken wir außerdem für einige wertvolle Hinweise.

Literatur

- ¹⁾ R. Kieffer und W. Hotop, Pulvermetallurgie und Sinterwerkstoffe, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 2. Aufl. 1948.
- R. Kieffer und W. Hotop, Sintereisen und Sinterstahl, Springer-Verlag, Wien 1948.
- ²⁾ Erscheint im Arch. Eisenhüttenw.
- ³⁾ Th. Everts, Z. Metallkde. **29** (1937) 63.
- ⁴⁾ H. Winter, Nichtmetallische Werkstoffe des Maschinenbaus, Wolfenb. Verl.-Anst., Wolfenbüttel 1948.
- ⁵⁾ E. I. Shobert, Silver-Graphite, Metals Handbook, S. 1115, A.S.M. Cleveland/Ohio 1948.